

RF and Timing Reference Distribution System for J-PARC Linac

T. Kobayashi^{1,A)}, E. Chishiro^{A)}, S. Anami^{B)}, S. Yamaguchi^{B)} and S. Michizono^{B)}

^{A)} Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

J-PARC (Japan Proton Accelerator Complex) linac, which is 300 m long, consists of 324 MHz accelerating section of the upstream and 972 MHz section (as future plan) of the downstream. In the klystron gallery, totally about 60 RF source control stations will stand for the klystrons and solid-state amplifiers. The error of the accelerating field must be within +/- 1 degree in phase and +/- 1% in amplitude. Thus, the high phase stability is required to the RF reference for all of the low-level RF control systems and the beam monitor systems.

This paper presents a final design and the summary of the performance evaluation of the RF reference distribution system including the timing control signal distribution for this linac.

J-PARC リニアック用高周波及びタイミング基準信号分配システム

1. はじめに

現在、原研東海サイトに建設が進められているJ-PARC加速器^[1]のリニアックは、全長約300mで、負水素イオンを400MeVまで加速し、後段の3GeVリングもしくは核変換実験施設(ADS)へと入射する。加速の高周波源として、前半(<191MeV) 324MHzのクライストロン20台(RFQ, DTL, SDDL用)、後半(~400MeV) 972MHzのクライストロン21台(ACS用)により電力が供給される(図1参照)。また、10kW/30kW半導体アンプによりバンチャー/デバンチャー、チョッパーを駆動する。その他電磁石、ビームモニターシステムなども含め、クライストロンギャラリーには合計約60式の19インチ制御ラック(12面)が全長に渡って並ぶことになる。これらのすべての制御ラック並びにおいて高周波位相基準信号が必要となる。また、ビームパルス幅500 μ s、繰り返し50Hzでパルス運転されるため、そのため同期トリガー(タイミング基準)も同様である。

リング入射ビームの $\Delta p/p$ が0.1%以下である必要性から、リニアックの加速電場の位相誤差、振幅誤差にはそれぞれ $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 1\%$ 以内が要求されている。そのため位相基準には更に厳しい同期精度が必要で、その安定性は $\pm 0.3^\circ$ 以内を目標としている。時間にして972MHzの場合約 ± 1 ps以内であり非常に厳しい条件であるが、ビームロスの低減、高品質ビームの供給のためには、大強度加速器にとって加速位相の安定性は最も重要な要素の1つと言える。

500 μ sのビームパルスは、RFチョッパーによりDTLで加速される前に、入射リングのRF周期(約1MHz)でチョッピングされ、中間パルスが形成される^[2]。この3GeVリングから送信されるチョッピング信号は、

チョッパーで必要なだけでなく、それより下流においてもチョップドパルスに対するビームローディング補正やビームモニターのため、基準信号同様に全制御ラック並びへと分配されなければならない。

以上のように数種類の基準信号を、多くの制御機器へ、相互の位相精度を損なわずに送信するためには、どのように分配するのが現実的かつ経済的か、ということが問題となる。

本稿では、J-PARCリニアックにおける高周波基準信号分配システムに関して、これまで発表した評価結果をまとめ、更にタイミング系信号の分配も含めた最終的なデザインの詳細を紹介する。

2. 基準信号分配システム

2.1 分配信号

リニアックの基準信号としてギャラリーに分配する信号は次の5種類がある。

- (a) 高周波基準信号12MHz
- (b) チョッパー用信号1MHz
- (c) 50Hzトリガー(タイミング基準信号)
- (d) 12MHzクロック(タイミング基準信号)
- (e) タイプコード(タイミング基準信号)

(c)(d)(e)の信号(まとめてタイミング基準信号とする)は、J-PARC加速器全体のタイミングシステム^[3]として必要な基本信号で、必ず3信号がセットになる。(d)はトリガーの遅延時間をカウントする基準クロック、(e)は運転モードや各機器によってトリガー信号の振る舞い(遅延時間やON/OFF等)を決める制御コード(シリアル16bit)である。

¹ E-mail: tetsuya.kobayashi@j-parc.jp

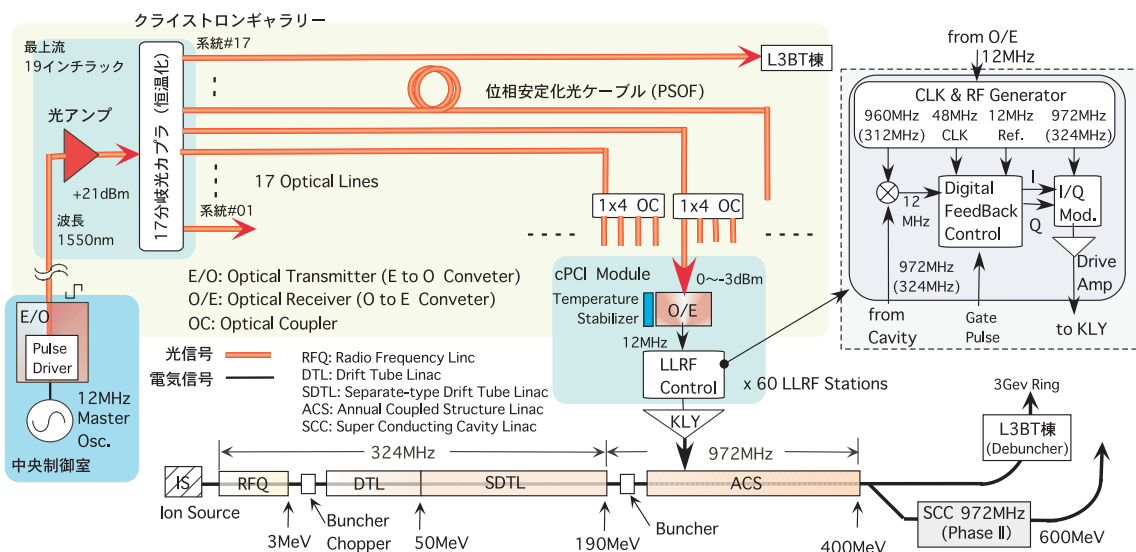


図 1 : 基準信号分配システムレイアウト

これら5種類の信号は中央制御室（チョッパー信号は3GeVリングの高周波電源室）からリニアックへ光信号で伝送られ、クライストロンギャラリー全体へと分配される。

2.2 高周波基準信号12MHz

高周波（RF）位相基準信号分配システムの全体構成を図1に示す。光信号による伝送を採用している。中央制御室の高純度マスターオシレーターにより生成された12MHzのRF基準信号は光信号でリニアックへ伝送され、リニアック最上流部において光信号を直接増幅・多分岐し、ローレベルRF制御（LLRF）ステーション約60ヶ所へ分配する。1つの信号源を光アンプにより増幅し、光カプラで多分岐することで、相互ジッターの増加をなくしている。光アンプを利用するため波長1550nmを選択した。クライストロン4台分（高圧DC電源1台に対応）に対して1本の光ケーブルで伝送することで計17分岐とする。1本の伝送先では5分岐し（図1では4分岐カプラとなっているが）、1つを位相モニターのため上流へ戻す。残り4つの信号を各LLRFステーションへ分配する。光信号を受け取った各LLRFステーションでは、この12MHzを基準に位相ロックをかけ、純度の高い加速信号324MHzを発生させる。ここでのPLLのループフィルタにより基準信号12MHzの速い（1kHz程度以上の）繰り返しジッターは吸収することができる。空洞の位相変動およびビームローディングに対してデジタルフィードバック制御を行い^[4]、これらの機器はcPCIのモジュールとして製作される。RF基準信号を受信するO/EもcPCIボード内に組み込む。

RF基準信号の光伝送には、位相安定化光ファイバー（PSOF：Phase Stabilized Optical Fiber）を使用する。PSOFは心線の2次被覆に負の膨張係数を持たせることで優れた温度係数を実現している。現在、古河電工がPSOFの製造を行っている。実際には6心PSOFケーブルを用い、うち3心（RF基準信号、そのモニター用戻り信号、チョッパー信号）を使用

する。PSOFの温度特性を評価した結果（0.4ppm/°C）から、ギャラリーの空調 $27 \pm 2^\circ\text{C}$ に対し、必要な位相安定性を達成するには更に光ケーブルの恒温化を必要とする^[5]。そのため、この光ケーブルを断熱ダクトに敷設し、ダクト内は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ に制御された冷却水パイプを通す（図6参照）。

安定な光伝送を実現するため、本システムのため新たなE/O、O/Eが開発された^[5]。その主な特徴としては、1ps以下の低伝送ジッター、ペルチェによる恒温化、小型化（cPCIボード内への組み込み）、などである。

光伝送路のコネクタ接続部などで振動等による変動をなくするため、RF基準信号伝送においては、最終的にファイバーはすべて融着接続する。そのためO/Eの受光部をピグテイル式に設計変更を行った（図2）。その他、本システムの性能評価の詳細は文献^[5]を参照。

2.3 チョッパー信号の伝送

チョッパー用信号は3GeVリングより伝送され、リニアック上流部で受信・多分岐し、制御機器全体に分配する。多分岐においては、O/Eで電気信号に変換・ファンアウトした信号を、再び光信号に変換して送信する。従って17台のE/Oが必要となる。タイミング基準信号伝送用に開発された光トランシーバを使用する予定である。光ケーブルはRF基準信号と併せてPSOFケーブルの1心をチョッパー用信号の伝

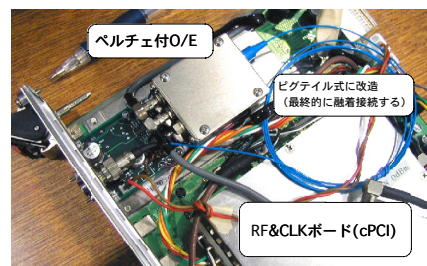


図 2 : O/Eをピグテイル式に変更。

送に用いる。

2.4 タイミング基準信号

RF基準信号の分配方式に合わせてタイミング基準信号の分配を行う。中央制御室より、50Hzトリガー、12MHzクロック、タイプコードの3信号を光信号で受信し、図3に示すようにリニアック全体に分配する。これら3信号セットで送受信可能な光トランシーバやファンナウトモジュール等がJ-PARCタイミングシステム用に開発されている^[3]。伝送ケーブルはRF基準信号とは別に、タイミング基準用に通常の6心光ケーブルを用意する（うち3心を使用）。タイミング基準信号はクライストロンギャラリーの制御ラックに加え、イオン源電源室、リニアック制御室、クライストロン電源室等に伝送される。

中央制御室においてRF基準信号12MHzとタイミング基準の12MHzクロックとは分けられ別ケーブル（波長が異なる）で伝送される。RF基準信号用としても専用のE/Oを用いる。

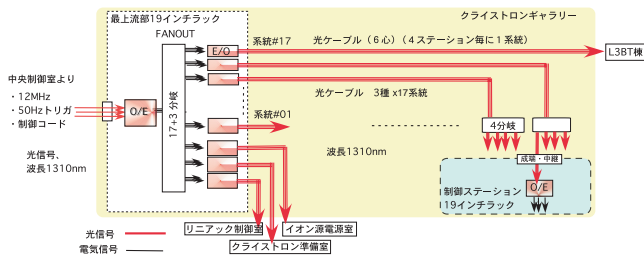


図3：タイミング基準信号分配システム

2.4 光ケーブルの敷設

以上、2.1～2.3節で説明される各基準信号は、クライストロンギャラリーの床下ピット（19インチラック下）に敷設する。具体的に示したものが図4、図5となる。図4はリニアック上流部19インチラックで受信した各信号を多分岐したのち床下ピットに入れリニアック下流側へ送信する方法を示している。図5では、それぞれの信号が伝送先で4分岐され各制御ラックへの分配方法の詳細である。図6に床下ピットの断面図を示す。断熱ダクトを置き、RFおよびタイミング基準信号用の光ケーブルを敷設する。光カプラもダクト内に置く。

3. ビーム加速試験

KEKにあるJ-PARCリニアック上流部の試験施設（DTL1までの20MeV陽子リニアック）において、12MHzのRF基準信号を本方式で分配しビーム加速の試験を行った。DTL1には、300mの位相安定化光ケーブルをクライストロンギャラリーの壁際ケーブルラックに周回させ敷設し、基準信号を伝送した。基準12MHzで位相ロックして324MHzの加速信号を生成する。ビーム加速は問題なく行われ、エネルギー、電荷透過率、エミッタンス等、通常のビーム試験と変わりはなかった。しかし、

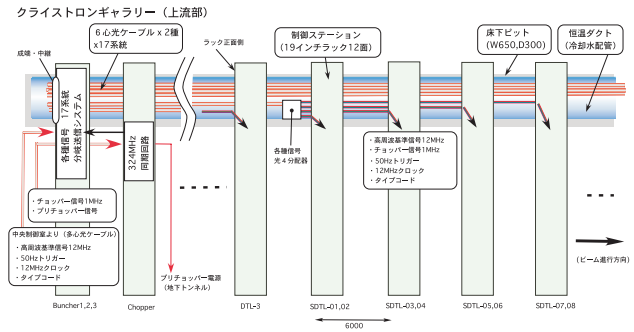


図4：光ケーブルの床下ピットへの敷設

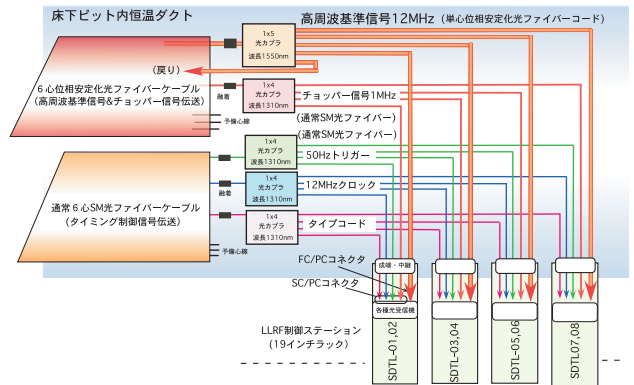


図5：各基準信号の4分岐。

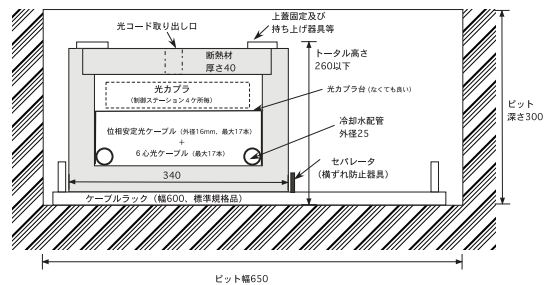


図6：床下ピット断面図。

324MHz発振器PLLの温度特性によりに位相の温度ドリフト（1°/C程度）が生じる問題があることが分かっている対策を検討している。

4. まとめ

J-PARCリニアックにおけるRF基準信号、タイミング基準信号3種及びチョッパー信号の分配システムについて最終的なデザインの詳細を紹介した。

参考文献

- [1] URL: <http://www.j-parc.jp/>
- [2] S. Fu and T.kato, "RF-chopper for JHF linac", Nucl. Instr. and Meth. A457, 296, 2000
- [3] F. Tamura, et al., "J-PARC Timing System", Proc. of ICALEPCS 2003, 2003
- [4] S. Michizono, et al., "Digital RF Control System for 400-MeV Proton Linac of JAERI/KEK Joint Project", Proc of Linear Accelerator Conference 2002, 2002
- [5] T. Kobayashi, et al., "RF Reference Distribution System for J-PARC", Proc. of the Linear Accelerator Meeting in Japan, pp. 366-368, 2003